

DE INVLOED VAN DE ZANDGRADATIE OP HET LUCHTGEHALTE VAN BETON

H. Corporaal
ENCI, Den Bosch
hcorporaal@enci.nl

G. Jurriaans
ECCRA, Duiven
g.jurriaans@eccra.nl

Samenvatting

In dit onderzoek is de invloed van de korrelopbouw van het zand op het luchtbelsysteem in de mortel bepaald. Er zijn drie zandgraderingen gedefinieerd met een verschil in het gehalte aan fijn materiaal < 250 µm. (zand “laag”, “gemiddeld” en zand “hoog”. De zandgradering heeft een significante invloed op het luchtbelsysteem in de mortel. Bij zand “gemiddeld” ontstaan de meeste kleine luchtbellen (<300 µm), een kleiner afstandsfactor, een hoger specifiek oppervlak van de luchtbellen en een hoger gehalte aan totaal lucht. Dit alles leidt tot een betere vorst- en dooibestandheid en verwekbaarheid. Zand “laag” creëert meer grote luchtbellen.

In tegenstelling tot wat in de meeste literatuur wordt aangegeven, resulteert meer en minder fijn in het zand, zonder water correcties, in een lager totaal luchtgehalte. Zand “gemiddeld” met het hoogste luchtgehalte na verdichting heeft de grootste mogelijkheid het hoogste gehalte totaal lucht te creëren.

Wanneer water correcties voor de mortel worden doorgevoerd teneinde gelijke verwerkingscondities voor de drie zandtypen te verkrijgen, blijft de conclusie gelijk: "Zand “gemiddeld” levert de meeste fijn verdeelde lucht in de mortel. Het is derhalve aan te nemen, dat de luchtbelgradering iets zegt over de grootte van de holle ruimtes tussen het toegepaste zand. Het lijkt erop alsof de luchtbellen de ruimtes tussen de ideale korrelopbouw en de toegepaste mengselopbouw opvullen. Een interessant aspect voor betonverhardingen en vorst- en dooibestandheid.

1. INLEIDING

In de betontechnologie is het bekend, dat kleine luchtbellen een beter gedrag qua vorst- en dooibestandheid heeft. Bevriezend water expandeert en de luchtbellen in het beton geven het water de gelegenheid te expanderen zonder interne spanningen te ontwikkelen. Er zijn twee goede mogelijkheden deze fijne luchtbellen in beton te bepalen :

- Een telmethode volgens ASTM C 457-90 bij verhard beton;
- De Air Void Analyser (AVA) bij verse mortel.

In de betontechnologie is het gebruikelijk om naar het totale luchtgehalte te kijken. Vorst- en dooibestandheid is dan ook gekoppeld aan het totale luchtgehalte.

Wanneer twee betonsoorten met hetzelfde luchtgehalte worden vergeleken, is het mogelijk dat de ene meer kleine en de andere meer grote luchtbellen heeft. Dit leidt tot een verschil in vorst- en dooibestandheid. We kunnen hierbij bijvoorbeeld denken aan betonverhardingen.

Dit alles wetende is het interessant om naar het luchtbelsysteem in beton te kijken en uit te zoeken welke aspecten van invloed zijn op dit systeem en de ontwikkeling van kleine luchtbellen.

2. Invloed van zandgradering op het luchtbelstelsel (Literatuur)

De korrelverdeling van het zand heeft, zoals aangegeven in de literatuur, invloed op het totale luchtgehalte. Er is echter geen onderzoek gedaan naar de invloed op het luchtbelgradering. Een samenvatting over wat de literatuur aangeeft is in onderstaande punten weergegeven:

- Research door Springenschmid et al, geeft aan dat de effecten van de luchtbelvormer afhankelijk zijn van de waterbehoefte van het zand, minerale kenmerken, korrelvorm en korrelruwheid. De zandgradering is eveneens van belang. Verhoogt men het gehalte aan fijne delen vereist dat een hogere dosering van de luchtbelvormer;
- Walz et al, rapporteert dat wanneer het zand in de range van 0,2 – 1 mm wordt verhoogd de resultaten van de luchtbelvormer zich verbetert;
- Breuckman and Rostasy et al, geeft aan dat er minder luchtbelllen worden gevormd, wanneer het aantal fijne delen (<250 µm) wordt verhoogd onder verdere gelijke condities;
- Fritch rapporteert dat de vorming van luchtbelllen door een luchtbelvormer bij een zeer hoog gehalte aan zeer fijne delen zelfs volledig uit den boze is;
- In overeenstemming met Neville, acteert de ingebrachte lucht net zo effectief als zeer fijne toeslagmaterialen;
- Lea's Chemistry of cement and concrete, beschrijft dat het totale luchtgehalte in beton verkleind wordt door:
 - een lager zandgehalte in beton;
 - een fijnere zandgradatie zone zoals aangegeven in BS 882 (zone 3 → 2);
 - verhoging van de zandfractie < 150 µm;
 - verhoging van het cementgewicht;
- Whiting et al, beschrijft in tegenstelling tot 'Lea', dat een lager gehalte aan fijne delen in het zand een hoger totaal luchtgehalte oplevert;
- Albrecht et al, laten zien dat het luchtgehalte in de verse specie wordt verhoogd, wanneer gebroken zand word vervangen door ronde zandkorrels.

De meeste rapporten die beton en het totale luchtgehalte behandelen, beschouwen het gehalte aan fijn verdeelde lucht en de afstandsfactor in de mortel als het meest interessante deel. In overeenstemming tot de beschreven onderzoeken wordt verwacht dat de zandgradering een invloed heeft op het luchtgehalte. Iedereen, behoudens Whiting, schijven dat: Meer fijne delen (< 250 µm) in het zand leveren minder luchtbelllen en vragen om meer luchtbelvormer. Met andere woorden: minder fijne delen in het zand zou moeten leiden tot meer luchtbelllen.

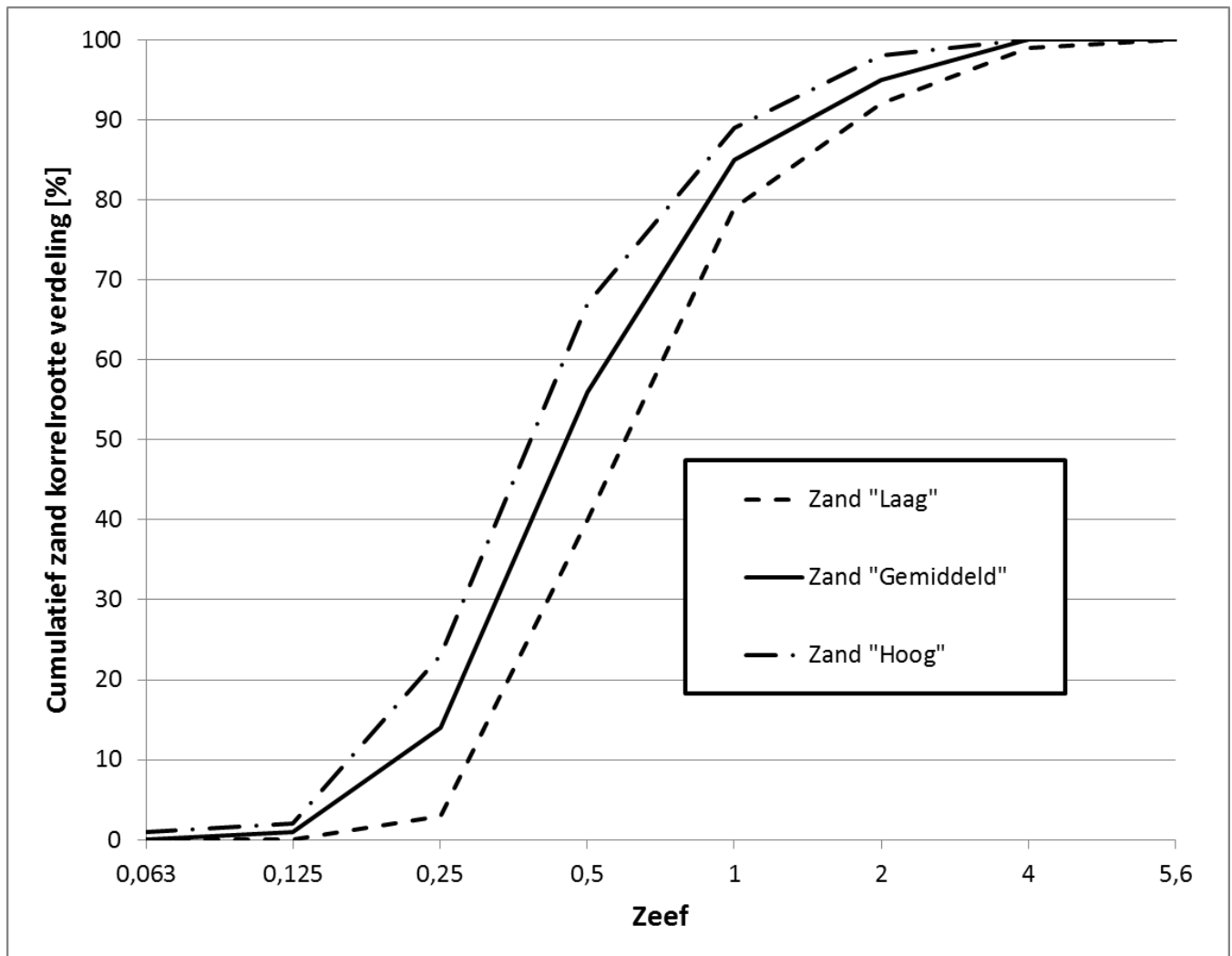
3. ZANDGRADATIES IN NEDERLAND

In Nederland is het gebruikelijk om natuurlijk zand van het Pleistocene geologische periode toe te passen. Dit natuurlijke zand wordt bijna overal in Nederland gewonnen. Het is door de rivieren vanuit de bergen getransporteerd en daarbij heeft het zijn ronde vorm gekregen. Het zand wordt gebaggerd en gezeefd, waarbij alle soorten zand kunnen worden gerealiseerd. De vorm is in het algemeen rond.

Een inventarisatie van de in Nederland gebruikte zanden 0-4 mm is uitgevoerd. Vanuit deze inventarisatie zijn drie verschillende zandgraderingen gedestilleerd, welke zijn gebaseerd op het gemiddelde zand en de uiterste grenzen van de inventarisatie, zie figuur 1. Alle drie typen zijn representatief voor de Nederlandse markt. In het onderhavige onderzoek zijn uitsluitend deze drie zandgradaties toegepast. In tabel 1 zijn de drie zandsoorten gedefinieerd.

Tabel 1 – Definities van de toegepaste zandgraderingen

Zandgraderingen	Karakteristieken
Zand "Laag"	Zandgradatie, welke de onderste grenzen van de inventarisatie volgt. De naam "Laag" geeft een laag gehalte aan fijne delen in het zand weer.
Zand "Gem"	Zandgradatie, welke de gemiddelde grenzen van de inventarisatie volgt. De naam "Gem" geeft een gemiddeld gehalte aan fijne delen in het zand weer.
Zand "Hoog"	Zandgradatie, welke de bovenste grenzen van de inventarisatie volgt. De naam "Hoog" geeft een hoog gehalte aan fijne delen in het zand weer.
<i>Opm. : (Bepaald aan de hand van de zeefrest op de 250 µm zeef)</i>	



Figuur 1 – Zandgradaties, welke zijn ontleend aan de inventarisatie in Nederland

4. MENGSELONTWERP

De toegepaste mortel om de invloed van de zandgradering op het luchtbelstelsel te bepalen bestaat uit cement, kalksteenmeel, luchtbelvormer, zand en water. Iedere component is hetzelfde gebleven, waarbij alleen de korrelopbouw van het zand volgens figuur 1 is gewijzigd. De tijdens dit onderzoek toegepaste mengselsamenstelling is een 1:1:6 (cement: kalksteenmeel: zand [V/V]) mortel. Het mengsel is weergegeven in tabel 2.

4.1. Cement, kalksteenmeel en lucht.

In dit onderzoek is een mengsel van Portland cement (CEM I), kalksteenmeel (regio Maastricht), (\approx 1:1 [V/V]) en een luchtbelvormer toegepast. Om dit mengsel constant te houden is gebruik gemaakt van een metselcement (MC 12,5 volgens EN 413-1 [22] en EN 413-2 [1]). De Blaine waarde van dit cement is $6240 \text{ cm}^2/\text{g}$.

4.2 Zand en korrelopbouw

Het toegepaste zand komt uit het noorden van Nederland. Het is een typisch rivierzand met een ronde korrelvorm. Om de korrelopbouw van de zandtypen uit figuur 1 te kunnen realiseren is deze opgebouwd uit 7 afzonderlijke fracties. Dit leidde tot een exacte korrelopbouw voor iedere geproduceerde mengsel t.b.v. dit onderzoek.

4.3 Water

Normaal gesproken is de hoeveelheid water gebaseerd op een schudmaat van $180 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. Door het verschil van korrelopbouw van het zand zullen zand “hoog” en zand “laag” meer en minder water nodig hebben om dezelfde verwerkbaarheid te krijgen. Voor alle mengsels is gekozen voor een vast watergehalte (vloei van 180 mm), waarbij zand “Gem” als standaardmengsel is gekozen. Later is gecontroleerd of de watercorrectie t.b.v. de verwerkbaarheid de resultaten heeft beïnvloed.

4.4 Mengprocedure

Het totale volume van ieder geproduceerde mortelmengsel is 2 liter. De mortel is gemengd in een Hobart menger. De mengprocedure is volgens EN-197-2 uitgevoerd.

Tabel 2 – Mengselontwerp van de mortel

Component		
CEM I	[g]	312
Kalksteenmeel	[g]	381
Zand	[g]	2770
Water *)	[g]	406
Lucht **)	[% V/V]	12,5
*) gebaseerd op 180 mm schudmaat bij zand “Gem”		
**) Komt overeen met 5% lucht in beton		

5. MEETPROGRAMMA

Voor iedere zandgradatie zijn de volgende metingen in drievoud uitgevoerd.

5.1 Verwerkbaarheid van de mortel

De verwerkbaarheid van de mortel hangt af van de kwaliteit van alle afzonderlijke componenten van de mortel men het mengselontwerp. Verwerkbaarheid is omschreven als een combinatie van schudmaat, stabiliteit en smeuiigheid :

- Schudmaat
De vloeï is bepaald volgens NEN 3835.
- Stabiliteit
De stabiliteit van de mortel zegt iets over de weerstand tegen bleeding en ontmeiging. Bleeding is visueel beoordeeld bij de proeven na 25 minuten. . Smeuiigheid
De smeuiigheid van de mortel zegt iets over hoe makkelijk een troffel door de mortel beweegt. Er is geen proef beschikbaar voor dit fenomeen. In dit onderzoek is de smeuiigheid bepaald en verdeeld in drie groepen:
 - Laag
De troffel gaat te gemakkelijk door de mortel. Het mengsel vertoont een verhoogde vorm van bleeding en voelt zanderig aan (lage stabiliteit, neigt tot ontmeiging).
 - Smeuig
De troffel gaat gemakkelijk door de mortel. Het mengsel is perfect. Goede vloeï en stabiel (geen bleeding);
 - Stug/Stijf
De troffel gaat moelijk door de mortel (stijf). Het mengsel vertoont een overdosis aan fijne delen, voelt stug aan en vertoont absoluut geen bleeding (goede stabiliteit) en vraagt meer water om te kunnen gaan vloeien.

5.2 Sterkte

De druksterkte resultaten zijn uitgevoerd om er zeker van te zijn dat er geen fouten zijn gemaakt bij de vervaardiging van de proefmengsels en het geeft een indicatie van de sterkte. Het is niet relevant voor het resultaat van het onderzoek. De druksterkte is uitgevoerd conform EN 413-2.

5.3 Luchtbelstest

Het luchtgehaltesysteem is bepaald met de AVA, volgens ASTM 457-90. De AVA is niet specifiek bedoeld om het totale luchtgehalte in de mortel te bepalen. Deze is gemeten met:

- De alcoholmethode, volgens EN 413-2.
- De weegmethode, volgens [1] appendix B.

In tabel 3 zijn de inputparameters voor de AVA weergegeven. Het verwachte luchtgehalte in de mortel (zandmortel) is 12,5%, hetgeen resulteert in $\pm 5\%$ lucht in beton (60% grof toeslagmateriaal).

Tabel 3 – Input parameters voor de AVA

	Zand Laag	Zand Gem	Zand Hoog
Mortel < 6 mm	100%	100%	100%
Pasta volume < 250 μm	35,2%	40,9%	46,0%
Luchtgehalte mortel	12,5%	12,5%	12,5%
Volume “proefstuk”	20 ml	20 ml	20 ml
Zand < 250 μm	83,1 g	387,8 g	637,1 g

Dichtheid zand	2640 g/l	2640 g/l	2640 g/l
Dichtheid mengsel (verdicht)	1890 kg/m ³	1877 kg/m ³	1882 kg/m ³
Holle ruimte % (verdicht)	28,4 %	28,9%	28,7%

6. RESULTATEN

6.1 Resultaten over de gehele linie

Alle meetresultaten zijn het gemiddelde van drie metingen en zijn in tabel 4 en figuur 2 weergegeven. In dit hoofdstuk is iedere parameter individueel weergegeven. Als een verschil als significant wordt gekenmerkt is dit een resultaat van een statistische berekening, waarbij gebruik gemaakt wordt van een significant niveau van 98 %.

6.2 Schudmaat

Zoals mag worden verwacht is de schudmaat van de drie mortels verschillend. De mortel met het grootste gehalte aan fijne delen in het zand (zand Hoog) heeft meer water voor dezelfde verwerkbaarheid nodig dan een mortel met minder fijn (zand Gem). Het watergehalte in de drie mortels is hetzelfde. Ondanks de verschillen in schudmaat worden alle mortels als verwerkbaar aangemerkt en er werd geen bleeding geconstateerd.

6.3 Total luchtgehalte

Het totale luchtgehalte gemeten met de weegmethode en de alcoholmethode zijn gelijk. De invloed van de zandgradatie op het totale luchtgehalte is duidelijk zichtbaar. Een significant verschil is gemeten tussen zand Gem (12,8%) en zand Laag (11,8%), en tussen zand Gem (12,8%) en zand Hoog (12,0%) bij het gebruik van de alcoholmethode. Zand Gem levert het hoogste gehalte aan totaal lucht.

6.4 Afstandsfactor

De invloed van de zandgradatie op de afstandsfactor is substantieel. Zand Gem (0,099 mm) heeft een significant lagere afstandsfactor in vergelijking met zand Hoog (0,143 mm) en zand Laag (0,138 mm). Tussen zand Laag en zand Hoog is geen significant verschil. De luchtbelletjes in de mortel van zand Gem liggen het dichtst bij elkaar.

6.5 Specifiek oppervlak van de lucht

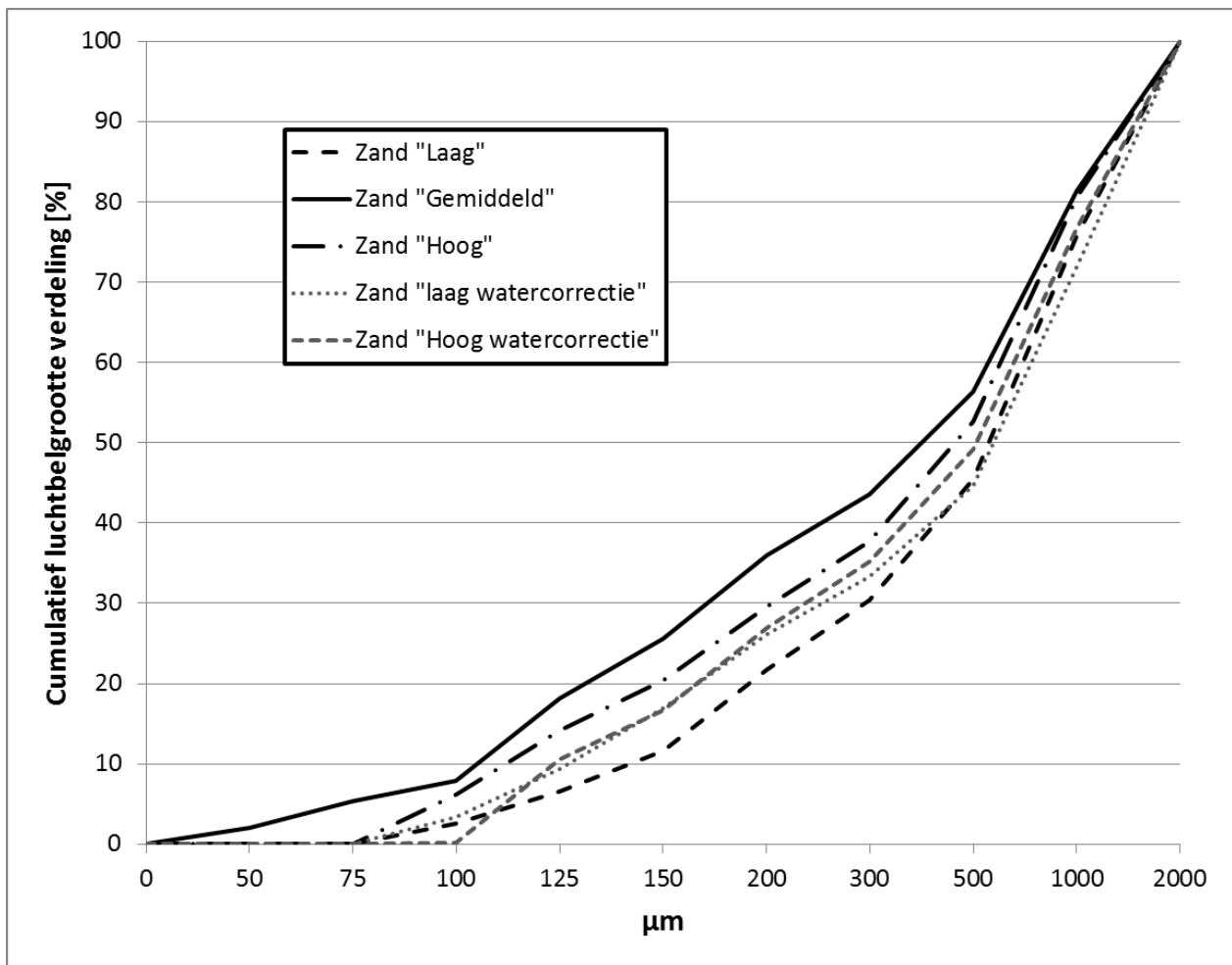
De invloed van de zandgradatie op het specifiek oppervlak van de lucht is voor alle drie zandsoorten significant verschillend. Het laagste specifiek oppervlak is gevonden bij zand Laag (17,8 mm⁻¹) gevolgd door zand Hoog (22,0 mm⁻¹) en het hoogste specifiek oppervlak is gemeten bij zand Gem (26,7 mm⁻¹).

6.6 L-300 waarde

Alle drie zandgraderingen hebben een significant verschil bij de L-300 waarde. De meeste kleine luchtbellen zijn gevonden bij de mortel met zand Gem (6,7 %), gevolgd door zand Hoog (5,4 %) en zand Laag (4,3 %).

Tabel 4 – Gemiddelde resultaten

		Zand Laag	Zand Gem	Zand Hoog	Zand Laag	Zand Hoog
Fysische					Water correctie	
Schudmaat	mm	195	180	162	173	175
Lucht (weegmethode)	%	11,9	12,6	12,2	13,6	11,8
Lucht						
(alcoholmethode)	%	11,8	12,8	12,0	13,1	12,0
Watergehalte	%	10,5	10,5	10,5	9,5	11,0
Druksterkte N07	N/mm ²	13,6	13,1	12,8		
Druksterkte N28	N/mm ²	16,7	16,5	16,2		
Visueel						
Stabiliteit-Bleeding	Yes/No	No	No	No	No	No
Smeuigheid	L/V/S	L	P	S	L/P	P/S
AVA						
Totaal lucht < 2 mm	%	14,4	15,6	14,6	16,6	15,4
Totaal lucht < 0,35	%	7,5	9,6	8,3	8,4	8,5
Afstandsfactor	mm	0,138	0,099	0,143	0,105	0,15
Specifiek opp. lucht	mm ⁻¹	17,8	26,7	22	19,3	20,2
L-300 waarde	%	4,3	6,7	5,4	5,4	5,3



Figuur 2 – Luchtbelverdeling (AVA air < 2 mm)

6.7 Luchtbelverdeling

De luchtbelverdeling is in figuur 2 weergegeven. De invloed van de zandgradatie op de luchtbelverdeling is duidelijk. Zand Gem levert een verdeling met het grootste gehalte aan kleine luchtbelllen en het kleinste gehalte aan grote luchtbelllen.

De invloed van de zandgradatie op het totale gehalte aan kleine luchtbelllen (<300 µm) is reeds omschreven in paragraaf 6.6. Zand Gem met de hoogste L-300 waarde produceert significant meer luchtbelllen in de groep 50-75 µm, 100-125 µm en 125 - 150 µm, e.e.a. in vergelijking met zand Laag en Hoog.

Zand Laag produceert de meeste grote luchtbelllen en de minste kleine belllen. Zand Gem produceert de minste grote luchtbelllen en de meeste kleine luchtbelllen. Zand Hoog ligt er tussenin.

7. WAT GEBEURT ER IN WERKELIJKHEID?

7.1 Invloed van de zandgradatie op het luchtgehalte

In de meeste literatuur is men het erover eens: 'meer fijne delen (<250 µm) in het zand levert minder luchtbelllen op en vraagt om meer luchtbelvormer'. Alleen Whiting beschrijft in zijn betononderzoek dat: 'een lagere hoeveelheid fijne delen in het zand levert een hoger luchtgehalte op'.

Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt, lettend op de alcoholmethode, dat het totale luchtgehalte van zand Gem significant hoger is dan zand Laag en zand Hoog. Met andere woorden een optimum van het totale luchtgehalte wordt bereikt met zand Gem. Meer of minder fijne delen in het zand levert een lager totaal luchtgehalte op. De resultaten van de metingen kunnen de contradictie in de literatuur verklaren:

- Whiting zou gemeten kunnen hebben in het gebied 'zand Laag' → 'zand Gem'
- De anderen zouden gemeten kunnen hebben in het gebied 'zand Gem' → 'zand Hoog'

De dichtheid en het luchtgehalte na verdichting geven aan dat zand Gem het grootste luchtgehalte heeft. De ruimten tussen de zandkorrels worden opgevuld door water, cement en lucht. Hoe hoger de ruimte tussen de toeslagmaterialen is en bij het gelijk blijven van het gehalte water en cement hoe meer ruimte er voor de ontwikkeling van luchtbellens overblijft. Zand Gem met het hoogste gehalte aan lucht na verdichting levert de luchtbelvormer de meeste gelegenheid om de grootste hoeveelheid aan totaal lucht te produceren.

De resultaten laten zien dat zand Gem de meeste kleine luchtbellens produceert. Meer of minder fijne delen in het zand hebben een negatief effect op de L-300 waarde, afstandsfactor en specifiek oppervlak. Kleine luchtbellens acteren als fijn zand. Zij rollen over elkaar en vergroten het vloeigedrag. Meer kleine luchtbellens leiden tot meer stabiliteit omdat er minder water nodig is en geeft het mengsel ook meer smeugheid. De kleine luchtbellens acteren als fijn zand zonder dat ze water nodig hebben om over elkaar heen te rollen. Algemeen kan worden gesteld:

'Meer kleine luchtbellens vergroten de verwerkbaarheid'.

Theorie:

De volgende theorie geeft een antwoord voor het feit waarom zand Gem de meeste kleine luchtbellens produceert. Lucht wordt tijdens het mengen in de mortel gebracht. De ingebrachte lucht wordt tot kleinere luchtbellens door de zandkorrels vermalen. Kleine luchtbellens hebben de neiging om samen te smelten tot grotere luchtbellens. De maximale afmeting van de luchtbellens hangen af van de ruimte tussen de zandkorrels en dat betekent :

'Wanneer de ruimte tussen de zandkorrels groter worden, wordt de lucht in de mortel de ruimte geboden meer luchtbellens te vormen'.

Met andere woorden: 'de zandgradering met het grootste gehalte aan kleine tussenruimten zal de meeste kleine luchtbellens produceren'. Zand Gem produceert in dit onderzoek de meeste kleine luchtbellens. Zand Gem heeft, volgens deze theorie, het grootste gehalte aan kleine ruimten tussen de zandkorrels, gevolgd door zand Hoog en zand Laag.

'De luchtbelgradatie in de mortel zegt iets over de ruimtes tussen de zandkorrels'.

In theorie is het mogelijk een ideale korrelbouw van de beton te creëren met poeders, fijn en grof toeslagmateriaal. In deze ideale gradering zijn de holle ruimten in het droge mengsel nagenoeg gelijk aan nul en de beschikbare ruimte voor luchtbellens is zeer gering.

'Een ideaal mengselontwerp staat alleen de vorming van kleine luchtbellens toe'.

Wanneer het verschil tussen het ideale mengsel en het toegepaste mengsel heel klein is, zijn er slechts kleine holle ruimten aanwezig voor de ontwikkeling van kleine luchtbellens. Hoe meer er van de ideale curve wordt afgeweken, met in acht name van de theorie van "Particle interference", hoe groter de ruimte in de gradering zullen zijn en hoe groter de luchtbellens zullen zijn. Hoe groter het verschil tussen het ideale mengsel en het toegepaste mengsel is hoe groter de ruimte tussen de korrels van het droge mengsel zullen zijn. Het lijkt erop dat de luchtbellens de ruimten tussen het ideale mengsel en het toegepaste mengsel opvullen.

Deze theorie leidt tot de conclusie dat zand Gem is:

- de zandgradering dat in dit onderzoek het dichtst bij de ideale gradering ligt;
- het zand de kleinste holle ruimten in het droge mengsel heeft;
- het zand dat de gelegenheid biedt tot de vorming van de meeste kleine luchtbellen

7.2 Invloed van de watercorrectie op het lucht systeem.

Er is in dit onderzoek gekozen om het watergehalte (10,5%) voor alle zandgradering hetzelfde te houden. Om een indicatie te krijgen wat het effect van de watercorrectie, voor gelijke vloeï, zijn metingen uitgevoerd. De resultaten zijn in tabel 4 gepresenteerd. De luchtbelgraderingen zijn in figuur 2 weergegeven.

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat het totale luchtgehalte groter of lager wordt afhankelijk of men meer of minder water in de mortel brengt. Het totale luchtgehalte en het watergehalte lijken in balans te zijn. De invloed van de zandgradatie op het totale luchtgehalte, zoals omschreven in paragraaf 6.3, is gedeeltelijk verdwenen nadat de watercorrectie 'dezelfde' vloeï heeft gecreëerd. Met name zand Laag met 1 % minder water produceert 1 % meer aan totaal lucht. Zand Laag is na de watercorrecties werkelijk verbeterd. Meer kleine luchtbellen hebben zich gevormd. Het lijkt erop dat minder water de zandkorrels dichter bij elkaar brengt. Kleinere ruimtes zijn beschikbaar om kleine luchtbellen te vormen. In dit geval worden er meer kleine luchtbellen gevormd. Zand Hoog verbetert na de watercorrecties niet. Minder kleine luchtporiën worden gevormd. Meer water duwt de korrels als het ware uit elkaar. Daardoor worden grotere ruimten tussen de zandkorrels gevormd, waarin zich grote luchtbellen kunnen nestelen. Daardoor worden minder kleine luchtbellen gevormd. De watercorrectie voor de vloeï heeft de smeuiigheid een klein beetje veranderd. Het schrale mengsel met zand Laag wordt smeuiiger en het vette/stijve mengsel met zand Hoog wordt eveneens smeuiiger. Beide zijn echter niet zo goed als de smeuiigheid van zand Gem. De watercorrectie bij een gelijke vloeïcapaciteit veranderd de conclusie niet:

Zand Gem vormt nog steeds de meeste kleine luchtbellen (<300 µm).

7.3 Praktische waarde van dit onderzoek

De praktische waarde van dit onderzoek is dat de zandgradering zo dicht mogelijk bij de ideale gradering (zand Gem) zou moeten liggen. In die situatie creëert de luchtbelvormer de meeste kleine luchtbellen. Dit leidt tot een goede vloeï, een hoge mate van stabiliteit (geen bleeding) en een goede plasticiteit. De kleine luchtbellen acteren als fijne delen in het zand zonder dat ze de mortel vet of stijf maken. De kleine luchtbellen hebben geen extra water nodig om over elkaar heen te kunnen rollen, dit in tegenstelling tot de zandkorrels.

Deze resultaten kunnen een toegevoegde waarde voor betonverhardingen waaraan lucht wordt toegevoegd. De vorst- en dooizoutbestandheid kan worden verhoogd door gebruik te maken van een grotere hoeveelheid fijn luchtbellen en een verlaging van de afstandsfactor. Het kiezen van een zandgradering die dicht bij de ideale gradering (zand Gem) ligt draagt terwege bij aan de kwaliteit.

8. CONCLUSIES

In dit onderzoek is de invloed van de zandgradering op de luchtporiestructuur onderzocht. Drie zandgraderingen zijn gedefinieerd: zand Laag, zand Gem en zand Hoog. Het verschil is het aantal

fijne delen ($< 250 \mu\text{m}$, gespecificeerd als Laag, Gem en Hoog) in het zand. Vanuit de resultaten van het onderzoek kan het volgende worden geconcludeerd:

1. De zandgradering heeft een significante invloed op de luchtporiestructuur:
 - Mortels met zand Gem creëren de meeste kleine luchtbelllen ($< 300 \mu\text{m}$), een lagere afstandsfactor, een hoger specifiek oppervlak van de luchtbelllen en een hoger gehalte aan totaal lucht dan de mortels met zand Laag en zand Hoog.
 - Als de mortel met zand Laag vergeleken wordt met de mortel met zand Hoog resulteert zand Hoog met een groter gehalte aan kleine luchtbelllen, een groter specifiek oppervlak van de luchtbelllen en een hoger gehalte aan totaal lucht. De afstandsfactor is daarentegen nagenoeg gelijk.
 - Zand Laag produceert meer grote luchtbelllen dan zand Gem en zand Hoog. De holle ruimtes in het droge mengsel met zand Laag lijken groter te zijn, waardoor de luchtbelvormer de mogelijkheid heeft om grotere luchtbelllen te produceren.
 - In tegenstelling tot wat in de meeste literatuur wordt aangegeven, leveren meer en minder fijne delen in het zand, zonder watercorrecties, een lager totaal luchtgehalte. Zand Gem met de hoogste holle ruimte na verdichting heeft de mogelijkheid het hoogste totale luchtgehalte te creëren.
2. Als watercorrecties in de mortel worden doorgevoerd blijft de conclusie hetzelfde: "Zand Gem produceert de meeste kleine luchtbelllen in de mortel". Alleen de verschillen in het totale luchtgehalte zijn na de watercorrectie gedeeltelijk verdwenen.

Er lijkt een relatie tussen de zandgradering en de luchtbelgrootte verdeling in de mortel te bestaan. De ontwikkelde theorie stelt :

- Als holle ruimtes in het zand groter worden, wordt de mogelijkheid geboden dat zich grotere luchtbelllen ontwikkelen;
- De luchtbelgradering in de mortel zegt iets over de holle ruimtes in het toegepaste zand;
- Een ideale mengselgradering staat alleen de ontwikkeling van kleine luchtbelllen toe;
- Hoe meer verschil er tussen de ideale mengselgradering en de toegepaste mengselgradering is, hoe groter de holle ruimte in het droge mengsel is;
- Het lijkt erop dat de luchtbelllen de holle ruimte tussen ideale mengselgradering en de toegepaste mengselgradering door luchtbelllen worden opgevuld.

Verder onderzoek om deze theorie te bewijzen/staven is noodzakelijk.

8. AANBEVELINGEN

Het luchtbelstelsel bij mortels, inclusief mortel voor betonverhardingen, staat aan de vooravond om ontdekt te worden. Onderhavig project onderzoekt slechts één aspect die het luchtbelstelsel beïnvloeden. Het zou interessant zijn om uit te vinden wat de invloed van andere parameters (bijv.: mengtijd, temperatuur etc.) op het luchtbelstelsel is. De reden voor het feit dat men aan het begin staat is dat tot op heden uitsluitend het totale luchtgehalte gemeten wordt. Een "nieuwe" meetmethode (AVA), maakt het mogelijk dat informatie over het luchtbelstelsel van de verse specie binnen 30 minuten beschikbaar is.

Om een juiste luchtbelstelsel te verkrijgen en te houden is een "ideale" korrelgradering noodzakelijk. In het geval dat een "ideale" korrelgradering wordt toegepast zal de intensieve verdichting, welke normaliter bij de uitvoering van betonverhardingen wordt gehanteerd, bijna alle grootte luchtbelllen uit de verse specie verdrijven. Dat betekent dat men de luchtbelvormer de mogelijkheid moet bieden lucht in de range van ca. $63\text{-}300 \mu\text{m}$ (stabiele lucht) te produceren. Dit kan bij een "gap-graded" korrelopbouw in deze range worden gerealiseerd. De concurrentie tussen fijne luchtbelllen en fijne delen in het mengsel wordt dan gereduceerd en het vereiste luchtbelstelsel kan zich dan vanzelf ontwikkelen. De verdichtingsenergie van de trilnaalden zullen deze zeer stabiele luchtbelllen niet verstoren.

LITERATUUR

CORPORAAL H. (2002) "The influence of sand grading on the air void system of fresh masonry mortar". Internal report ENCI bv – ACT project March, 2002.

EN 413-1 (1994) Masonry cement - part 1: Specifications. European Standard, CEN, Brussels.

EN 413-2 (1994) Masonry cement - part 2: Test methods. European Standard, CEN, Brussels.

ASTM C-457-90: Standard Test Methode for microscopical Determination of parameters of the Air void system in Hardened concrete.

SPRINGENSCHMID R., BREITENBTICHER R., SETZER M. (1987) "Luftporenbeton-Neuere Untersuchungen zur Feinsandzusammensetzung liegezeit und nachdosierung von luftporenbildnern". In: Betonwerk + fertigteil-technik, Vol 53, heft II. S. 742-748.

WALZ, K: "Luftporenbildende Betonzusatzmittel". Berlin: Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. (Heft 123)

WALZ, K, SCHÄFFLER, H. "Feststellungen über den Einfluß der Betonzusammensetzung auf die Bildung von Luftporen. In: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen. Neue Folge, Heft 20. S 42-58.

BREUCKMANN, K (1975) "Einflüsse bei der Herstellung von Luftporenbeton im Betonstraßenbau. In: Tiefbau-Ingenieurbau-Strassenbau Vol 17 ,Heft 3 [1975], S. 135-138.

ROSTASY, F.S., RANISCH, E.H. (1980) "Untersuchungen über den Einfluß der Feinsandanteile auf die Verdichtungswilligkeit von Beton. Abschlußbericht zum Forschungsauftrag 8.042 G 77 A des Bundesministers für Verkehr, Bonn. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, juli 1980.

ALBRECHT, W., HARTMANN, E.: (1969) Der Luftgehalt von steifen Straßenbetonen. Otto-Graf-Institut; Schriftemeihe der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, TU Stuttgart, 1969. - (Heft 44)

HEMICHSEN A., VYNCKE J. (1995) "Quality assurance of air void structures in concrete". International symposium NON-destructive testing in civil Engineering, Berlin 1995, Dansk Beton Teknik (DK)

FED. HIGHWAY ADMINISTRATION "Air Void Analyser Evaluation Washigton DC, USA". (FHWA A-SA-96-062)

NASSER K., SINGH B. (1995) "A new method and apparatus for determining the air-void parameters in fresh and hardened concrete". Adam Nevill Symposium on concrete technology. Proceedings of second CANMET/ACI international symposium. Las Vegas, june 1995/ V.M. Malhotra (ed.), p. 239-256 .

SIEBEL H. (1990) "Determination of the air-void parameters in fresh concrete". Rilem proceedings II-part 9. March 5-7, 1990

NEVILLE A,M. (1995) "Properties of concrete". Fourth and final edition. Harlow: Longman, 1995.

LEA F.M. (1988) "Chemistry of cement and concrete". Arnold, fourth edition, 1988

PRICE B. (1996) "Measuring air voids in fresh concrete". Concrete journal, july/august 1996.

DTB "Idea and calculation basis for fresh pore analysis". Dansk Beton Teknik: (Internal report)

NEN 3835 (1991) "Mortels voor metselwerk van stenen, blokken of elementen van baksteen, kalkzandsteen, beton en gasbeton". - Delft: NNI, 1991. - 2de druk.

WHITING D., NAGI M. (1988) "Manual on control of air content in concrete". Skokie: Portland Cement Association

BETONIEK (1996) Bellen in Beton. Jrg. 10, nr. 20

HANSEN W. (1991) "Quantitative and rapid measurement of the Air-void system in fresh concrete". University of Michigan; Strategic Highway Research program, National Research Council, 1991.

ANSARI F. (1991) "Rapid in-place air content determination in fresh concrete". Concrete International, Vol 13, nr. 1 [1991], page 39-43.

SIEBEL E., EICKSCHEN E. (1993) "Bestimmung der Luftporenkennwerte am Frischbeton". Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1993. - (Heft 640)